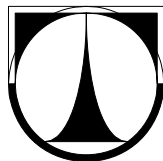


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Liberec 2007

**Daniel Hančil**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: 1234R567 – Elektronické informační a řídicí systémy

## **Jednoduchá lokalizace zvukového zdroje**

### **Simply localization of acoustic source**

#### **Bakalářská práce**

Autor:	<b>Daniel Hančil</b>
Vedoucí práce:	Ing. Zbyněk Koldovský, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jindřich Žďárský, Ph.D.

**V Liberci 18. 5. 2007**



## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Zde bych chtěl poděkovat všem, kteří se, ať už přímo či nepřímo, podíleli na úspěšném dokončení této práce. Hlavně rodině za podporu a také panu Ing. Zbyňku Koldovskému, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost a čas. Byl příkladným vedoucím.

## **Anotace**

Cílem této práce je navržení a praktické využití algoritmu pro jednoduchou lokalizaci zvukového zdroje. V práci jsou rozepsány základní fyzikální rysy zvukového zdroje, signálu a okolního prostředí. Určení pozice se zakládá na zjištění časového zpoždění mezi jednotlivými signály. Z tohoto jsme schopni spočítat směr příchozího signálu. Chyba této metody silně závisí na kvalitě signálu, na použitém hardwaru (mikrofony – kvalita, zvuková karta – vzorkovací frekvence) a na okolních podmínkách. V dnešní době již lze použít i sofistikovanější metody.

## **Abstrakt**

The purpose of this presentation is proposition and practical usage of algorithm for simply localization of acoustic source. We consider the basic physical features of acoustic sources, signal and environment. Determination of localization is based on detection of time delay between individual signals. From this we can count direction of arrival signal. Error of this way strongly depends on quality of signal, on used hardware (microphones – quality, sound card – sampling rate) and on ambient conditions. We can use more advanced methods today.

## Obsah

<b>ANOTACE .....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRAKT .....</b>	<b>6</b>
<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>1. ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA .....</b>	<b>9</b>
1.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ RYSY .....	9
1.1.1 Tvar vlnoplochy .....	9
1.1.2 Rychlost šíření signálu .....	10
1.1.3 Ozvěna .....	10
1.2 HARDWARE .....	11
1.2.1 EDIROL – FireWare audio převodník FA-101 .....	11
1.2.2 Mikrofony .....	12
<b>2. VLASTNÍ ALGORITMUS .....</b>	<b>13</b>
2.1 NASTAVENÍ KONSTANT .....	13
2.2 VYTVÁŘENÍ ZDROJOVÉHO SIGNÁLU PRO SIMULACE .....	13
2.3 VZÁJEMNÁ KORELACE .....	13
2.4 GEOMETRIE .....	15
<b>3. EXPERIMENTY .....</b>	<b>18</b>
3.1 SIMULACE .....	18
3.2 PRAKTICKÉ EXPERIMENTY .....	20
3.2.1 Pokus číslo 1 .....	21
3.2.2 Pokus číslo 2 .....	23
3.2.3 Pokus číslo 3 .....	24
3.2.4 Pokus číslo 4 .....	26
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>27</b>
<b>REFERENCE .....</b>	<b>28</b>
<b>PŘÍLOHA .....</b>	<b>29</b>

## Úvod

Budeme se zabývat jednoduchou lokalizací zvukového zdroje. Rozmístěné pole mikrofonů jsou navrženy pro široké spektrum aplikací. Hlavní využití je monitorování plochy, včetně detekce, identifikace a lokalizace jednoho nebo více objektů zájmu. Například ve vojenství střežení a prozkoumávání bojového perimetru. V jiném využití jako sledování (odposlech) nemocí a v multimediích jsou pole mikrofonů schopné vynést daný audio signál nad hlučné prostředí pro zlepšení srozumitelnosti například při mření kamerou. V komerční technice pole mikrofonů může nahradit jeden mikrofon. Představme si hands-free, kde se budou mikrofony natáčet a tak budou moci přesně sledovat polohu mluvčího. Cílem této práce je vyzkoušet si chování zvukových signálů a ověřit použitelnost.

Práce je tématicky rozdělena do částí. V první části budeme zvažovat fyzikální rysy zdrojů a šíření signálů z nich pocházejících. V další části se budeme zabývat vlastní metodou lokalizace zvukového zdroje. Třetí část se zabývá experimenty a simulacemi. V konečné části nalezneme krátký závěr.



## **1. Základní problematika**

Na začátku si ujasníme fyzikální vlastnosti a zákonitosti tohoto problému. Musíme si uvědomit jaké jsou atributy zdroje a signálu z něj vycházejícího. Záleží na tom jestli se jedná se o signál akustický či seismický, vibrační, jestli má signál úzké nebo široké spektrum frekvencí, jaký je poměr vzdáleností jednotlivých mikrofonů ku vzdálenosti od zdroje a nebo jestli známe přesně rychlost šíření signálu. Tyto vlastnosti jsou dané fyzikální podstatou a nemůžeme je tedy naším ovlivňovat.

### **1.1 Základní fyzikální rysy**

Akustický a seismický zdroj mají většinu vlastností obdobných, ale jsou zde i zásadní rozdíly. Projíždějící vůz nebo třeba chůze člověka vytváří signály oba, zvuk i chvění. Tyto signály nazýváme širokopásmové, protože poměr nejnižší a nejvyšší obsažené frekvence je velký. Například lidské ucho je schopné zachytit zvuk v pásmu od 20 Hz do 20 kHz (v závislosti na zdroji informací se dané frekvence mohou lišit), podíl těchto kmitočtů je 1000 a tudíž se jedná o signál se širokým pásmem frekvencí. Naopak v bezdrátové síti LAN podle normy IEEE 802.11b obsahuje signál frekvence od 2 GHz po 2,4835 GHz a jejich poměr je tedy přibližně pouze 1,2. Tyto signály s úzkým pásmem frekvencí mají relativně dobře definovanou vlnovou délku a časové zpoždění se dá lehce určit z posunutí fáze, u širokopásmových není žádná definovaná vlnová délka a proto musíme časové zpoždění spočítat pomocí interpolace signálů. Díky časovému zpoždění jsme schopni spočítat úhel mezi spojnicí mikrofonů a přicházejícím signálem.

#### **1.1.1 Tvar vlnoplochy**

Když je zdroj, ať už akustický či seismický, blízko mikrofonům nebo jiným senzorům, je vlnoplocha přicházejícího signálu zakřivená. Zakřivení závisí na vzdálenosti a čím je tato vzdálenost větší, tím se vlnoplocha narovná a stává se rovinnou. Je-li zdroj

dostatečně vzdálen od senzorů nebo jsou mikrofony blízko sebe uvažujeme vlnoplochu jako rovinu. Takto se dá podstatně jednodušeji zjistit úhel přicházejícího signálu. Například jsou-li mikrofony umístěny v řadě za sebou a mezery mezi nimi jsou totožné, je totožné i časové zpoždění mezi každými sousedními mikrofony a my můžeme určit směr přicházejícího signálu.

### 1.1.2 Rychlost šíření signálu

Pro akustický zdroj je rychlost šíření signálu dobře známa a je přibližně 345 m/s. Měřitelné atmosférické parametry jako teplota nebo složka rychlosti větru podél směru šíření signálu mají druhořadý účinek a můžeme je zanedbat. Pro zajímavost uvedeme vztahy pro rychlost zvuku v závislosti na teplotě a ostatních stavových veličinách.

$$c = (331,82 + 0,61t) \text{ms}^{-1} \quad (1.1)$$

$c$  je rychlost zvuku a  $t$  je teplota ve stupních Celsia.

$$c = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho_0}} \left( 1 + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (1.2)$$

kde  $p_0$  je tlak plynu při teplotě  $0^\circ \text{C}$ ,  $\rho_0$  příslušná hustota a  $\gamma$  součinitel teplotní roztažnosti plynu.

U seismického zdroje je rychlost šíření neznámá a silně závisí na materiálu, kterým informace prochází.

### 1.1.3 Ozvěna

I ozvěna může mít vliv na přesnost odhadu pozice zdroje. Ve vnitřních prostorech je ozvěna znatelná a odražený zvuk může dosahovat 10–90 % energie původního signálu v závislosti na materiálu. Kvůli odrazům se může stát, že již neodhadujeme pozici jednoho, ale více zdrojů. To může způsobit, že namísto přímého směru zdroj-senzor zachytíme dominantní odražený směr. V ideálním prostředí není žádné echo a energie zvuku klesá nepřímo úměrně kvadrátu vzdálenosti. Studie ukázaly, že energie seismického signálu klesá rychleji než jen s kvadrátem vzdálenosti. To znamená, že senzory vibrací reagují jen na blízké zdroje a musí být velmi citlivé.

## 1.2 Hardware

Rozhodující vlastnosti má také vybraný hardware – zvuková karta a mikrofony. U zvukové karty hraje největší roli vzorkovací frekvence a možnost synchronizace A/D převodníků. Vzorkovací frekvence silně určuje přesnost měření. Důležitá je také synchronizace. Nebudou-li senzory synchronizované, nebude zachycené časové zpoždění odpovídat realitě a nám vyjde špatný závěr. Mikrofony se dělí na pasivní a aktivní. My budeme používat mikrofony aktivní.

### 1.2.1 EDIROL – FireWare audio převodník FA-101

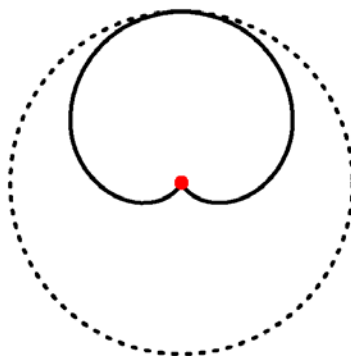
Uživatelům nabízí převodník celkem deset vstupních a stejný počet výstupních kanálů. Při tomto počtu umožňuje zpracovávat audio signál pomocí 24bitového rozlišení se vzorkovací frekvencí až 96 kHz. Vzorkovací frekvence se dá nastavit v těchto krocích: 44,1, 48, 88,2 a 96 kHz. Ale to není vše, co umí. Jestliže nevyužijeme všech vstupů a výstupů, můžeme využít smplovací frekvence až 192 kHz. Při této frekvenci se pracuje pouze se šesti kanály. My jsme ale neměli potřebný software a tak jsme této frekvence ani nevyužili. Výrobce tím zajišťuje, že zpracování bude probíhat bez většího zatížení DSP procesoru. Přední panel převodníku FA-101 je vykreslen na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Přední panel převodníku FA-101

### 1.2.2 Mikrofony

U mikrofonů signál rozkmitá membránu a dalším zařízením se tyto vibrace převedou na signál elektrický. V závislosti na velikosti a konstrukci pouzdra mikrofonu může tento přijímat zvuk z různých směrů v různé intenzitě. Konstrukteři mikrofony záměrně navrhují s různými charakteristikami v závislosti na předpokládaném použití. Směrová charakteristika je frekvenčně závislá - projevuje se zpravidla u vysokých tónů, zatímco hluboké zůstávají nepoznamenány. My používáme kondenzátorový mikrofon s kardioidní směrovou charakteristikou. Kondenzátorový mikrofon pracuje tak, že akustické kmity rozechvívají membránu, která je jednou z desek kondenzátoru, připojeného do elektrického obvodu. V rytmu změny polohy desky se mění kapacita kondenzátoru a tím i napětí mezi deskami. Kondenzátorové mikrofony vyžadují napájení. Jsou pokládány za nej kvalitnější a používají se zpravidla pro profesionální záznam. Kardioidní neboli ledvinová charakteristika potlačuje příjem zvuku z prostoru za mikrofonom. Diagram připomíná Němcům a Čechům tvar ledviny (německé označení je Niere), Anglosasům srdce. Jde o typickou charakteristiku dynamických mikrofonů pro zpěváky, neboť potlačuje zpětnou vazbu. Prostorová charakteristika je znázorněna na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Charakteristika kardioidního mikrofonu

Lokalizaci zdroje provádíme ve dvojdimenzionálním prostoru a tak nám bohatě postačí čtyři mikrofony. Ze čtyř mikrofonů se dají získat tři vzájemné korelace.

## 2. Vlastní algoritmus

Naše metoda je založena na zjištění zpoždění signálů pomocí vzájemné korelace, následném „umělém“ posunu zdrojových signálů, určení úhlů mezi páry mikrofónů a přicházejícím signálem a proložením těchto směrů přímkami. Uvažujeme-li dva páry mikrofónů, pak pozici zdroje určíme jako průsečík těchto dvou přímek.

### 2.1 Nastavení konstant

Nebudeme-li chtít zjišťovat žádné závislosti, musíme nastavit všechny konstanty. Rychlost zvuku ( $c = 345$  m/s), vzorkovací frekvenci (v našem případě 8–96 KHz), prvotní signál a pozici mikrofónů a zdroje. Budeme-li provádět simulace, měníme vstupní data a sledujeme jejich závislost.

### 2.2 Vytváření zdrojového signálu pro simulace

Spočteme si jak jsou jednotlivé mikrofóny od zdroje daleko. Čas odpovídající danému dráhovému rozdílu získáme poměrem dráhy a rychlosti zvuku. Nyní můžeme přistoupit k vzájemnému umělému zpoždění jednotlivých signálů pomocí posouvání vzorků. O kolik vzorků se bude signál posouvat zjistíme součinem vzorkovací frekvence a času. Zde se dopouštíme první nepřesnosti a to, že výsledek se nedá interpretovat přesně, ale musí se zaokrouhlit na celé číslo (počet vzorků, o který se má daný signál posunout)! Pak apocítáme vlastní vzájemnou korelaci.

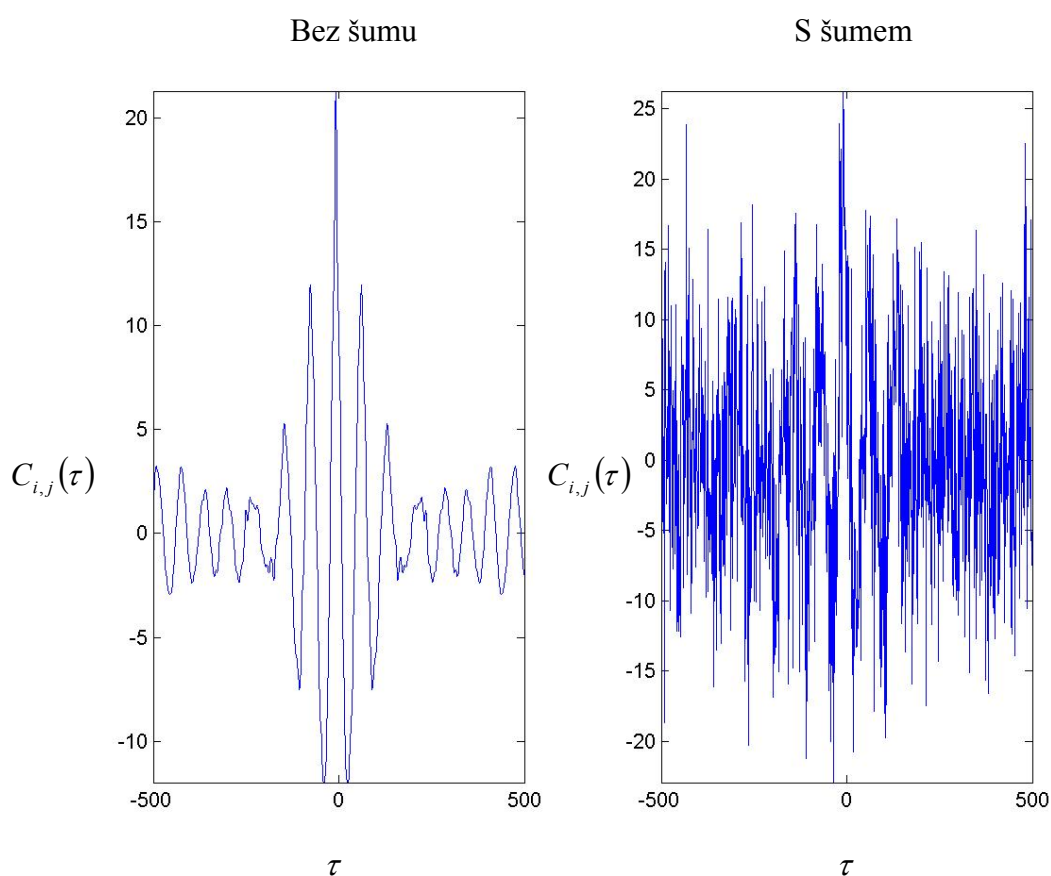
### 2.3 Vzájemná korelace

Vzájemná korelace je definována vzorcem

$$C_{i,j}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} a_i[n] * a_j[n - \tau] \quad (2.1)$$

kde  $a_i[n]$  je signál přijatý  $i$ -tým mikrofónem a  $\tau$  je testované zpoždění.

Tato funkce se dá samozřejmě několika způsoby normalizovat, my to však provádět nebudeme. V ideálním případě je vzájemná korelace  $C_{i,j}(\tau)$  maximální právě tehdy když  $\tau$  je přesně rovno posunu mezi danými signály. V programu Matlab se používá příkaz *xcorr*. Tento příkaz nám ušetří mnoho práce, protože se nemusíme zdržovat programováním *for* cyklů a doplňováním jednotlivých signálů o nuly – rozměry matic musí souhlasit. Tento přístup je nejvíce limitován silnou závislostí vzájemná korelace na statistických vlastnostech přicházejícího signálu. Na obrázku 2.1 je vidět co se stane s korelační funkcí, když na signál přidáme aditivní šum. V ilustraci pro zašumění signálu jsme použili příkaz z Matlabu *randn* s koeficientem 0,25.

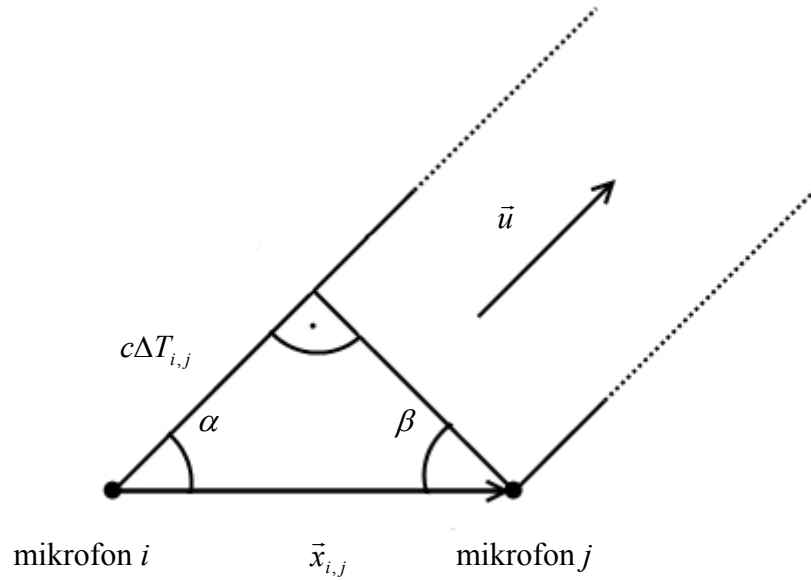


Obrázek 2.1: Vzájemná korelace bez a se zašuměným signálem

Například v lidské řeči se nalézá spousta periodických prvků a tak může mít vzájemná korelační funkce maxim několik. Musíme tedy vhodně zvolit o kolik vzorků na každou stranu budeme vzájemnou korelaci počítat. Použitím pole  $N$  mikrofónů je možné spočítat  $N(N-1)/2$  různých vzájemných korelací, ale pouze  $N-1$  z nich je na sobě nezávislých.

## 2.4 Geometrie

Jakmile máme zjištěno maximum vzájemné korelace, můžeme přistoupit k vlastnímu řešení polohy pomocí geometrie. Použijeme zjednodušení, že zdroj je v nekonečnu a vlnplocha je tedy rovina. Názorně je to vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Znázornění úhlů u mikrofonů

Použitím věty o skalárním součinu dostáváme

$$\cos \alpha = \frac{\vec{u} \vec{x}_{i,j}}{|\vec{u}| |\vec{x}_{i,j}|} = \frac{\vec{u} \vec{x}_{i,j}}{|\vec{x}_{i,j}|} \quad (2.2)$$

kde  $\vec{x}_{i,j}$  je vektor od mikrofonu  $i$  k mikrofonu  $j$  a  $\vec{u}$  je jednotkový vektor směřující ke zdroji.

Ze stejného obrázku si také můžeme odvodit vzorec

$$\cos \alpha = \sin \beta = \frac{c\Delta T_{i,j}}{|\vec{x}_{i,j}|} \quad (2.3)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku. Kombinací rovnic 2.2 a 2.3 dostáváme:

$$\vec{u} \vec{x}_{i,j} = c\Delta T_{i,j} \quad (2.4)$$

Tímto zjistíme úhel mezi párem mikrofonů a přicházejícím signálem.

Pomocí matice rotace ve tvaru

$$A = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

kde  $\gamma = \pi - \alpha$ ,

pootočíme jeden z mikrofonů tak, aby mířil na zvukový zdroj.

Platí

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$x_p, y_p$  jsou souřadnice pootočeného bodu a  $x, y$  jsou souřadnice originálu.

Osy rotace jsou jednotlivé středy párů mikrofonů. Tyto středy ale neleží v počátku souřadných os a proto je musíme i s daným mikrofonem nejdříve transponovat do počátku, tam otočit a zase posunout zpět. Výsledný vzorec vypadá takto

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_{st} \\ y - y_{st} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{st} \\ y_{st} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

kde  $x_{st}, y_{st}$  jsou souřadnice středu k příslušnému páru mikrofonů.

Nyní máme dva páry bodů mířících na zdroj ( $p_1, p_2, st_1, st_2$ ). Zbývá už jen určit průsečík přímek, které procházejí těmito body. Parametrické vyjádření přímky je

$$\begin{aligned} x_1 &= A_x + \vec{u}_x t \\ y_1 &= A_y + \vec{u}_y t \end{aligned} \quad (2.8)$$

pro první přímku a

$$\begin{aligned} x_2 &= B_x + \vec{v}_x s \\ y_2 &= B_y + \vec{v}_y s \end{aligned} \quad (2.9)$$

pro druhou.  $A$  a  $B$  jsou body na přímkách, v našem případě tedy buď střed páru mikrofonů nebo pootočený mikrofon, vektory  $\vec{u}$  a  $\vec{v}$  jsou směrnice přímek. Hledáme průsečík a tak se musí souřadnice rovnat, proto skombinujeme rovnice 2.8 a 2.9.

$$\begin{aligned} A_x + \vec{u}_x t &= B_x + \vec{v}_x s \\ A_y + \vec{u}_y t &= B_y + \vec{v}_y s \end{aligned} \quad (2.10)$$



Úpravou dostaneme

$$s = \frac{\vec{u}_x(A_y - B_y) + \vec{u}_y(B_x - A_x)}{\vec{u}_x \vec{v}_y - \vec{u}_y \vec{v}_x} \quad (2.11)$$

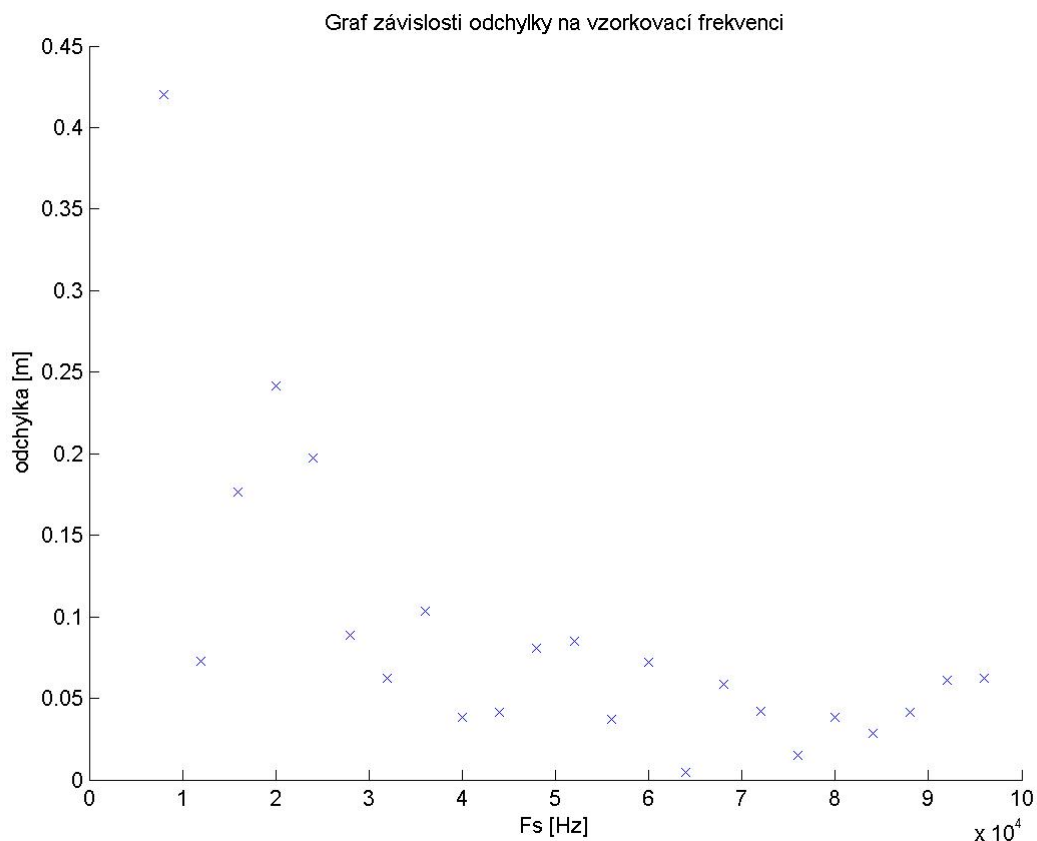
Nakonec zbývá jen dosadit do rovnice 2.9  $s$  a získáme souřadnice zdroje.

### 3. Experimenty

Abychom ověřili správnost této základní metody, připravili jsme pár experimentů, teoretických i praktických. Simulace, oproti praktickým experimentům, jsou přesnější, protože signál není zatížen různými šumy (pokud nejsou uměle přidány) a odrazy. Dají se tedy jednoduše zjišťovat různé závislosti na parametrech.

#### 3.1 Simulace

V teoretické simulaci jsme sledovali závislost přesnosti na vzorkovací frekvenci. Pro větší statistickou váhu jsem pokusy prováděl 100krát a výsledek zprůměroval. Čím je vzorkovací frekvence vyšší, tím je i přesnější odhadování polohy zdroje. Výsledná klesající závislost odchylky (vzdálenost o kterou je odhadnutá pozice vzdálená od skutečné) je vidět na obrázku 3.1.



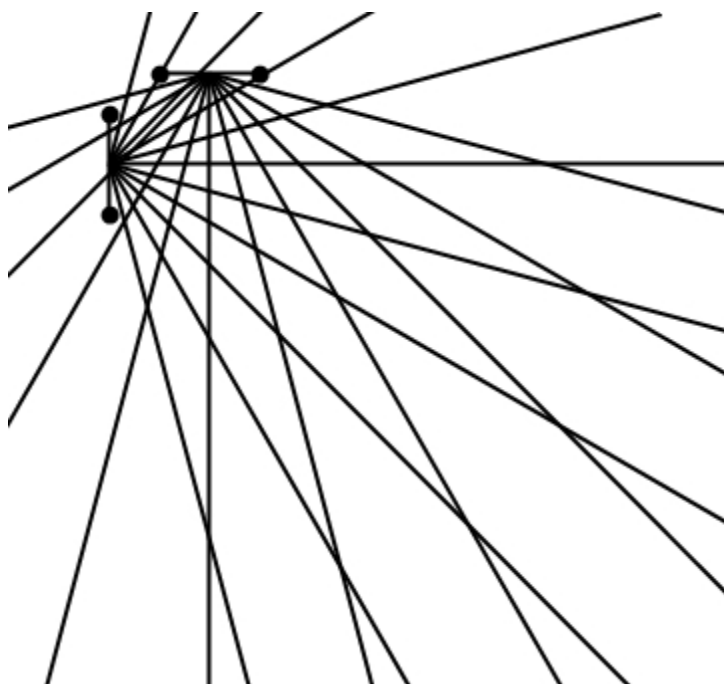
Obrázek 3.1: Závislost odchylky na vzorkovací frekvenci

V tabulce 3.1 je naznačeno, jak moc na vzorkovací frekvenci záleží. Je to tabulka minimálních vzdáleností v centimetrech dvou mikrofonů, které jsou schopné zachytit zpoždění právě o jeden vzorek. Signál přichází k páru mikrofonů pod úhlem  $\alpha$ .

Tabulka 3.1: Závislost rozlišitelnosti na vzorkovací frekvenci

	minimální vzdálenost mikrofonů v centimetrech schopných zachytit signály zpožděné právě o jeden vzorek			
$\alpha [^\circ]$	při $F_s = 8 \text{ kHz}$	při $F_s = 22 \text{ kHz}$	při $F_s = 44 \text{ kHz}$	při $F_s = 96 \text{ kHz}$
0	4,29	1,56	0,78	0,36
15	4,44	1,61	0,80	0,37
30	4,95	1,80	0,90	0,41
45	6,06	2,20	1,10	0,51
60	8,58	3,12	1,56	0,71
75	16,57	6,02	3,01	1,38

Ještě názornější může být plošné znázornění přesnosti. Měřitelné úhly jsou diskrétně rozloženy jak je vidět na obrázku číslo 3.2.



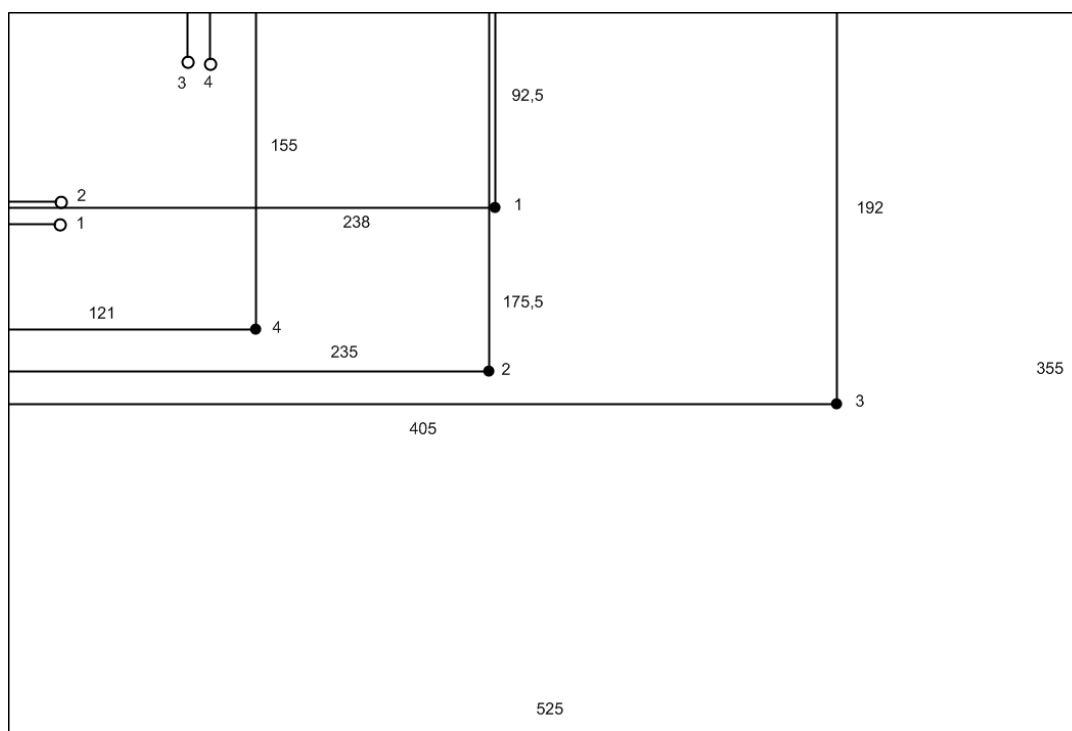
Obrázek číslo 3.2: Plošná zobrazení rozlišitelnosti

Plná kolečka znázorňují mikrofony a z jejich středů pod různými úhly vycházejí signály. Z toho vyplývá že polohu jsme schopni rozlišit pouze v jejich průsečících a

jednotlivé čtyřúhelníky nám udávají chybu. Vidíme, že se vzdáleností se dramaticky zvětšují.

### 3.2 Praktické experimenty

Všechny praktické experimenty jsme prováděli v místnosti jejíž parametry jsou vidět na obrázku 3.3.

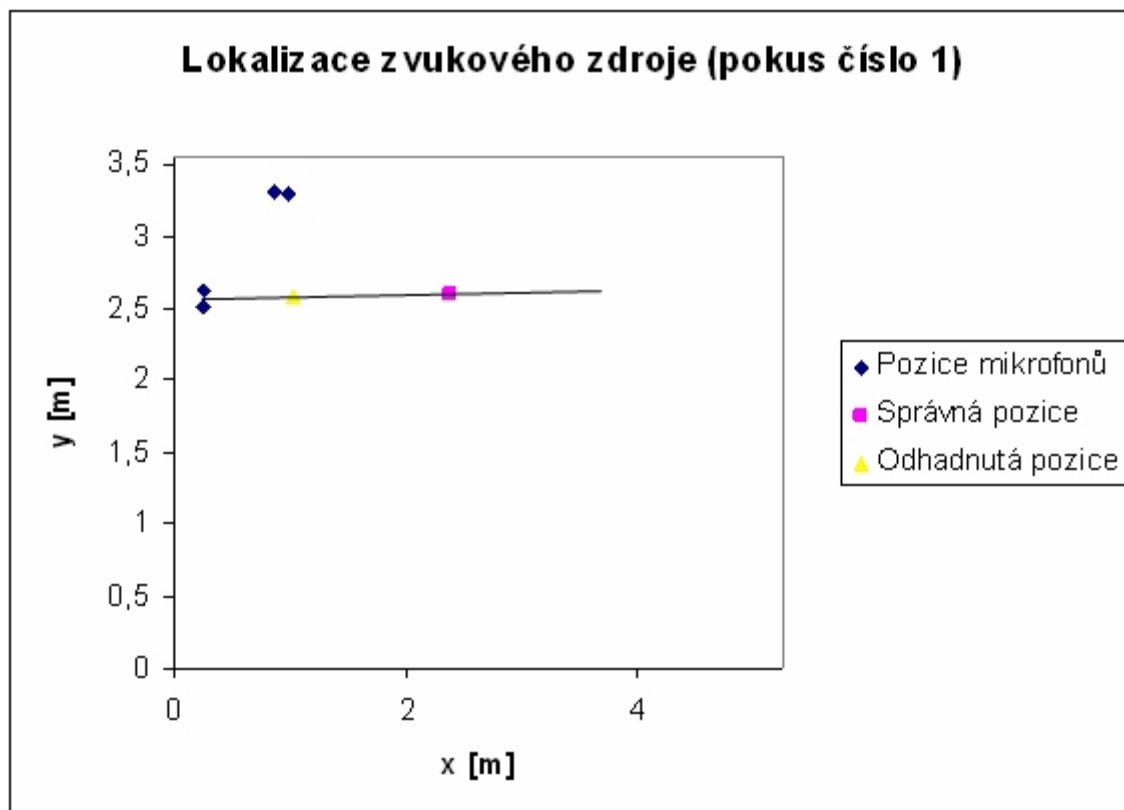


Obrázek 3.3: Rozmístění pozic v místnosti

Jako v teoretických experimentech i tady jsme položili počátek souřadného systému do levého spodního rohu místnosti. Mikrofony jsou označeny prázdnými kolečky a čtyři různé pozice pokusů plnými. Kvůli přehlednosti jsem neuváděl souřadnice mikrofonů do obrázku. Mikrofon 1 má tedy souřadnice  $[0,260; 2,515]$ , mikrofon 2  $[0,255; 2,625]$ , mikrofon číslo 3  $[0,875; 3,310]$  a mikrofon 4  $[0,985; 3,300]$ . Na pozicích pokusů jedna až čtyři bylo tlesknuto a signál byl zachycen mikrofony. Tyto zvukové stopy nalezneme na přiloženém CD.

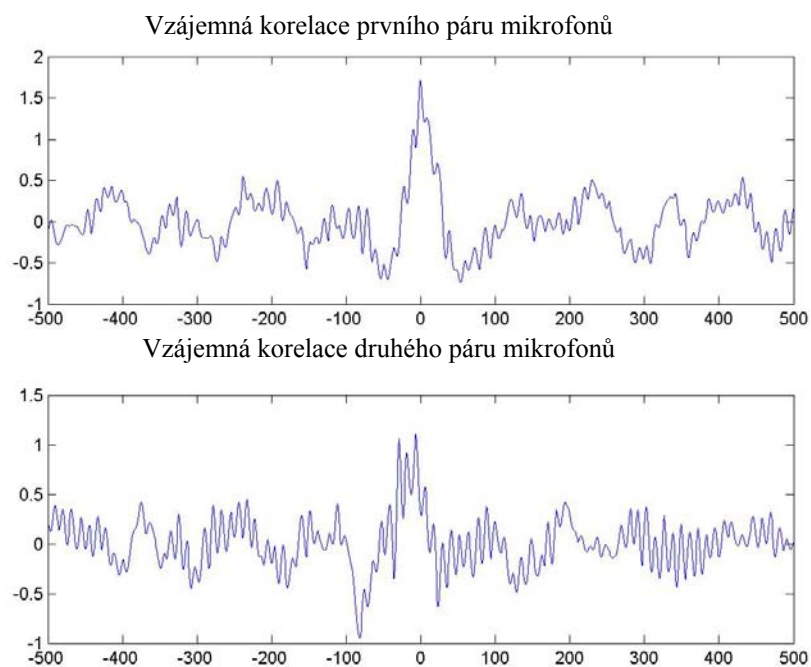
### 3.2.1 Pokus číslo 1

Jak je vidět na obrázku 3.4 vznikla v pokusu číslo 1 ne zrovna zanedbatelná chyba.



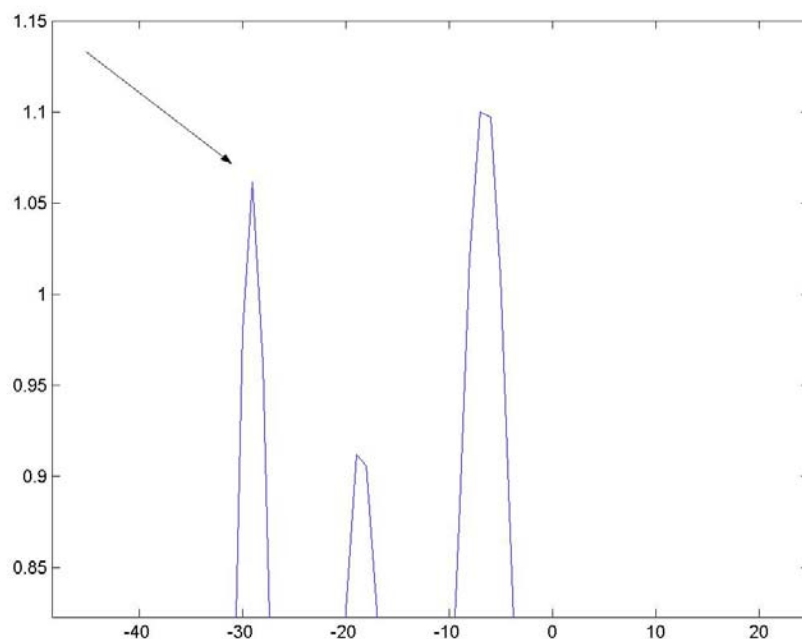
Obrázek 3.4: Odhadnutá pozice zdroje v pokusu číslo 1

Pozice zdroje byla v bodě [2,38; 2,595], ale algoritmus ji spočítal do bodu [1,03; 2,58]. Z tohoto vidíme, že první pár mikrofónů odhadl směr správně, s druhou dvojicí už je to horší. Porovnejme vzájemné korelační funkce první a druhé dvojice mikrofónů na obrázku 3.5.



Obrázek číslo 3.5: Porovnání vzájemných korelačních funkcí

Zde vidíme, že ve druhé vzájemné korelaci je podstatně složitější najít správné maximum. Prozkoumáme-li obrázek 3.6, kde je znázorněna vzájemná korelace druhého páru mikrofonů ve větším přiblížení, zjistíme, že obsahuje lokální maximum, které by odpovídalo správné pozici.

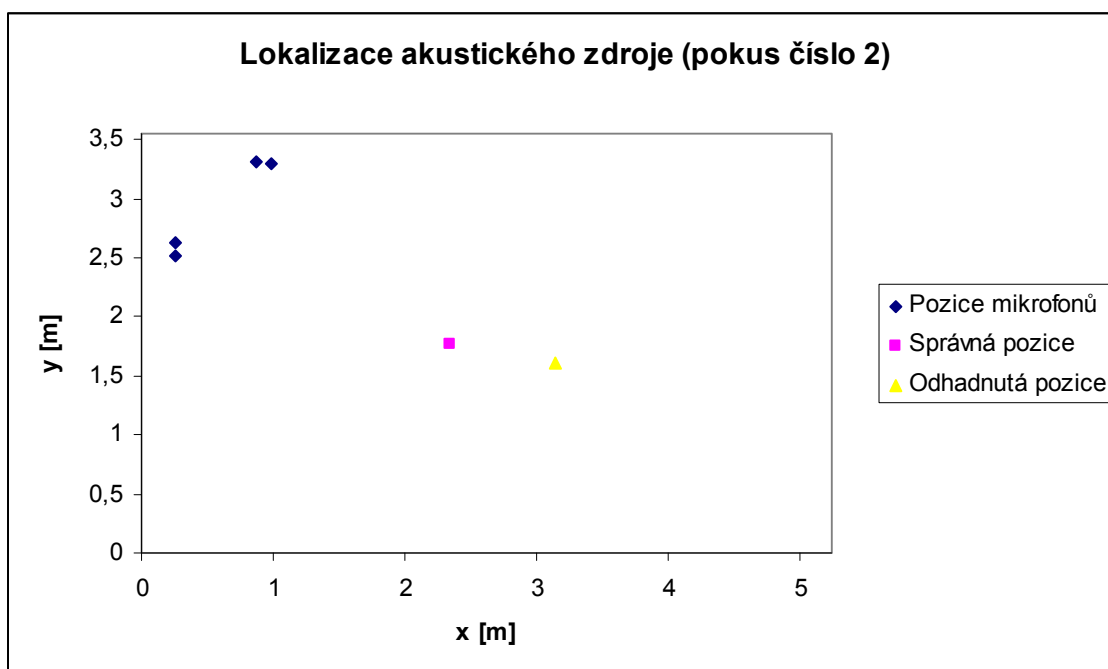


Obrázek číslo 3.6: Vzájemná korelační funkce druhého páru mikrofonů

Využijeme-li tohoto lokálního maxima odpovídající hodnotě 472 vzorků, dostaneme souřadnice odhadnutého zdroje  $[2,48; 2,60]$ , takže je oproti správné pozici posunut pouze o 9,8 cm. Chyba vznikla nejspíše kvůli ozvěnám v místnosti a v podélném směru mají mikrofony menší rozlišení.

### 3.2.2 Pokus číslo 2

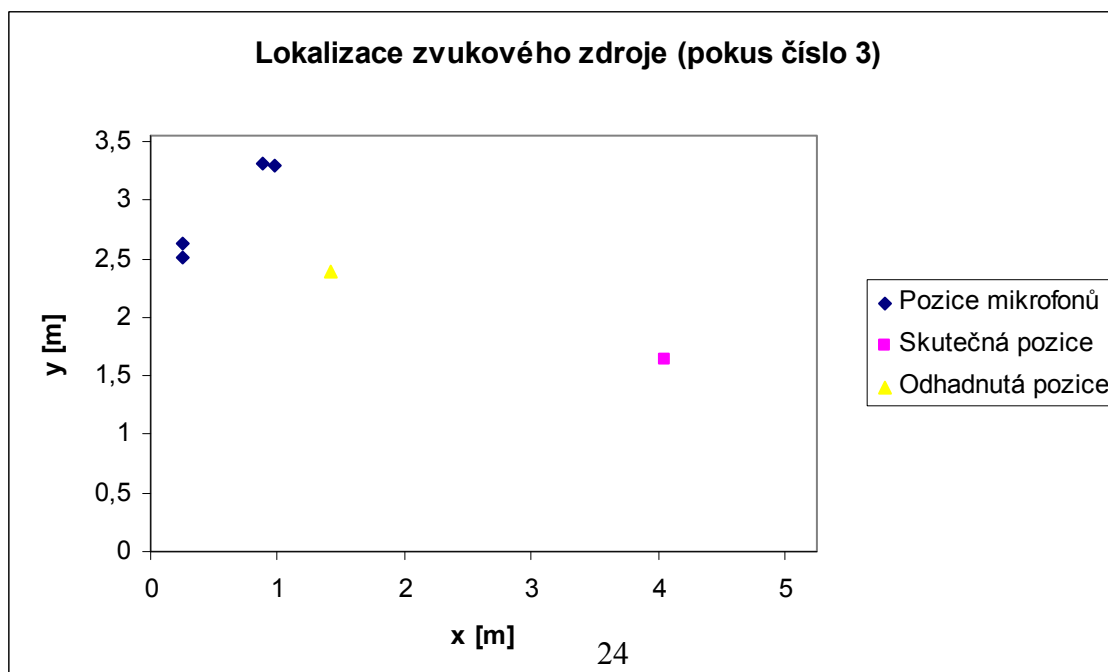
Souřadnice zdroje v pokusu číslo 2 jsou  $[2,35; 1,795]$  a  $[3,15; 1,61]$  jsou odhadnuté souřadnice. Zde bych chybu přisoudil diskrétnímu rozložení úhlů. Pozice jsou názorně zobrazeny na obrázku číslo 3.7.



Obrázek číslo 3.7: Odhadnutá pozice zdroje v pokusu číslo 2

### 3.2.3 Pokus číslo 3

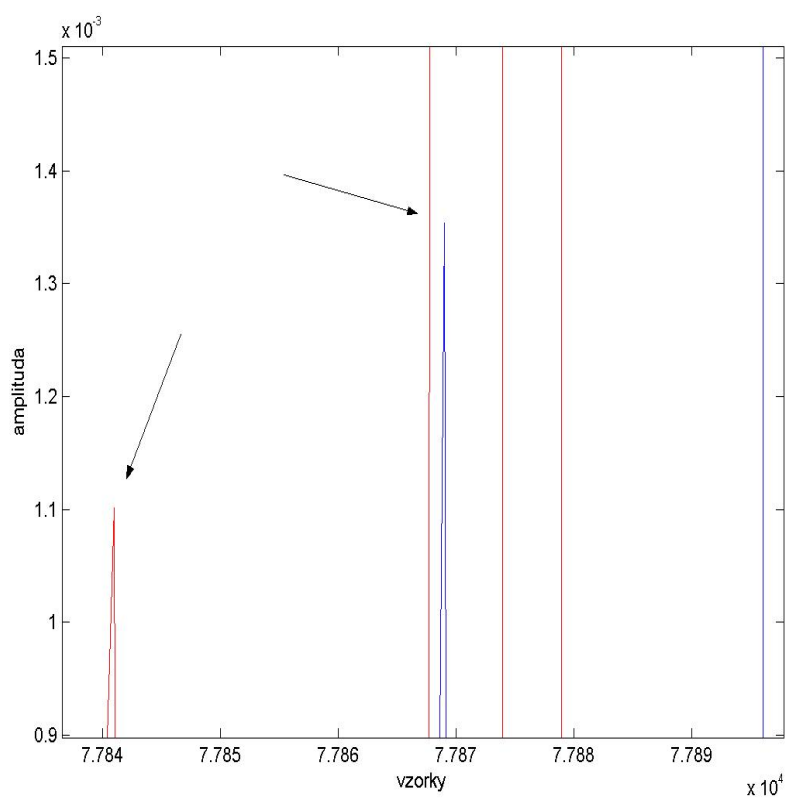
Při pokusu číslo 3 vyšla největší chyba. Algoritmus spočítal pozici zdroje na souřadnice [1,42; 2,40] namísto [4,05; 1,63]. Obraz je vidět na obrázku číslo 3.8.





Obrázek číslo 3.8: Odhadnutá pozice zdroje v pokusu číslo 3

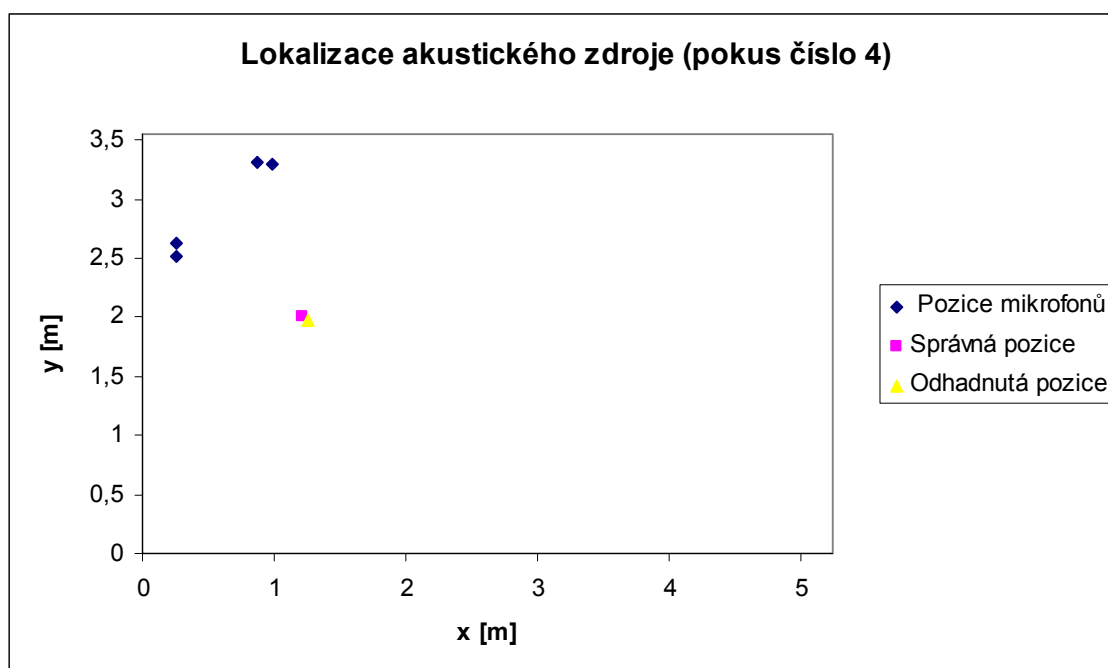
Souřadnice osy  $y$  vyšli relativně přesně. Chyba je tedy ve vzájemné korelační funkci mezi mikrofonom číslo 3 a 4. Podíváme-li se na obrázek číslo 3.9, kde jsou signály z těchto mikrofonů zobrazeny, jsme časové zpoždění schopni odhadnout. Odpovídá asi 29 vzorkům. Tento „ruční“ odhad už dává lepší výsledek, vychází souřadnice [3,69; 2,05].



Obrázek číslo 3.9: Signály přijaté 3. a 4. mikrofonom

### 3.2.4 Pokus číslo 4

S pokusem číslo 4 nebyly žádné problémy a vyšel téměř přesně, odchylka je pouze 6 cm. Souřadnice vyšly [1,26; 1,97], skutečné souřadnice byli [1,21; 1,55]. Ilustraci můžeme vidět na obrázku číslo 3.10.



Obrázek číslo 3.10: Odhadnutá pozice zdroje v pokusu číslo 4

## **Závěr**

Nastudoval jsem metodu pro jednoduchou lokalizaci zvukového zdroje. Napsal jsem pro tuto metodu i jednoduchý algoritmus, který je uveden v příloze a také v digitální formě na přiloženém CD. Tímto se tedy splnily teoretické i praktické požadavky. Dále jsem se seznámil s funkcí zvukové karty EDIROL FA-101. Výsledky této metody (i když jednoduché) dávají na menší vzdálenosti velmi přijatelné výsledky. Největší roli na přesnost hraje vzorkovací frekvence, kvalita mikrofónů a akustické vlastnosti místnosti, kde se prováděli experimenty.

## Reference

- [1] J. C. Chen, K. Yao, and R. E. Hudson, “Source Localization and Beamforming“, IEE Signal Processing Magazine, March 2002.
- [2] Hlaváč V., Sedláček M.: Zpracování signálů a obrazů, Skripta FEL ČVUT, Praha 2000, ISBN 80–01–02114–9.
- [3] B. Porat, “A Course in Digital Signal Processing“ John Wiley and Sons, 1997.

## **Příloha**

Zde je uveden zdrojový kód algoritmu pro simulace. V Matlabu se před komentáři píše znak procenta, pro funkčnost to tedy nebudeme měnit.

```
clc;  
clear all;  
close all;
```

### **%Zdrojová data**

```
rychlostzvuku = 345;  
Fs = 44000;  
hudba = wavread ('doprava.wav');          % signál, který budeme testovat  
zdroj = [1.21 2];                          % souřadnice zdroje  
mikro = [0.26 2.515; 0.255 2.625; 0.985 0.25; 0.875 0.24]; % souřadnice  
mikrofonů
```

### **%Vytváření zdrojového signálu a zjištění zpoždění**

```
for i= 1 : 4  
    vzdalenost (i) = norm (zdroj – mikro (i,:));  
    signal = zeros (i, 12000);  
end  
cas = vzdalenost / rychlostzvuku;          % čas, za který dorazí signál k mikrofonům  
pocetvzorku = round (cas * Fs);
```

```

for i = 1 : 4
    for k = 1 : 11815
        signal (i, k + pocetvzorku (i)) = hudba (k);    % připravení zdrojového signálu
    end
end

```

### % Vzájemná korelace

```

N = 500;
korelace (1, :) = xcorr (signal (1, :), signal (2, :), N);
korelace (2, :) = xcorr (signal (3, :), signal (4, :), N);
[pom posun] = max (abs (korelace));    %zjištění vrcholu korelacni funkce
posun = posun - N - 1;

```

### % Odchylka od mikrofonů

```

vzdalenost_mikro (1) = norm (mikro (1, :) – mikro (2, :));
vzdalenost_mikro (2) = norm (mikro (3, :) – mikro (4, :));
realposun = posun / Fs * rychlostzvuku;    %spoctení realneho (metrickeho)
posunu
uhel (1) = acos (realposun (1) / vzdalenost_mikro (1));
uhel (2) = acos (realposun (2) / vzdalenost_mikro (2));

```

### % Průsečík

```

stredmikro (1, 1) = (mikro (1, 1) + mikro (2, 1)) / 2;    %středů mikrofonů
stredmikro (1, 2) = (mikro (1, 2) + mikro (2, 2)) / 2;
stredmikro (2, 1) = (mikro (3, 1) + mikro (4, 1)) / 2;
stredmikro (2, 2) = (mikro (3, 2) + mikro (4, 2)) / 2;
uhel = pi - uhel;
% matice rotace
maticerotacea = [cos (uhel (1)) –sin (uhel (1)); sin (uhel (1)) cos (uhel (1))];
maticerotaceb = [cos (uhel (2)) –sin (uhel (2)); sin (uhel (2)) cos (uhel (2))];
% pootočený „mikrofon“ aby mířil na zdroj
a = maticerotacea * (mikro (2, :) – stredmikro (1, :))' + stredmikro (1, :);
b = maticerotaceb * (mikro (4, :) – stredmikro (2, :))' + stredmikro (2, :);
% směrnice přímk
u (1) = a (1) – stredmikro (1, 1);
u (2) = a (2) – stredmikro (1, 2);

```

```

v (1) = b (1) – stredmikro (2, 1);
v (2) = b (2) – stredmikro (2, 2);
%parametrické zadání přímky
% x = a(1) + u(1)t          x = b(1) + v(1)s
% y = a(2) + u(2)t          y = b(2) + v(2)s

s = (u (1) * (a (2) – b (2)) + u (2) * (b (1) – a (1))) / (u (1) * v (2) – v (1) * u (2));

```

### **%Výsledky**

```

x = b (1) + v (1) * s;
y = b (2) + v (2) * s;
plot (mikro (1, 1), mikro (1, 2), 'rx', mikro (2, 1), mikro (2, 2), 'rx', mikro (3, 1), mikro
(3, 2), 'rx', mikro (4, 1), mikro (4, 2), 'rx', zdroj (1), zdroj (2), '+-', x, y, '*');
axis tight;

```